

주거 건물의 설계 및 시공단계를 고려한 실내공기질 평가 프로그램 개발에 관한 연구

최 동 희, 강 동 화, 김 선 숙, 여 명 석*, 김 광 우*

서울대학교 건축학과 대학원, *서울대학교 건축학과

Development of Home Indoor Air Quality evaluation program considering planning and construction stage

Dong-Hee Choi, Dong-Hwa Kang, Sun-Sook Kim, Myoung-Seok Yeo*, Kwang-Woo Kim**

ABSTRACT: The objective of this study is to develop Home Indoor Air Quality evaluation program considering planning and construction stage for architects, engineers and occupants to estimate and improve the IAQ of a home. In this study, the IAQ modeling technique was discussed to determine the appropriate modeling of housing unit in Korea. The program algorithm was developed based on the selected model reflecting planning and construction stage. This program can be applied to estimate the IAQ of a home and encourage appropriate action in advance.

Key words: Home Indoor Air Quality(주거의 실내공기질), Evaluation Program(평가 프로그램), planning(설계), construction(시공)

기 호 설 명

<p>A : 자재 면적[m²]</p> <p>C_a : 공기중 오염물질 농도[mg/m³]</p> <p>C_{as} : 자재표면 주변 오염물질 농도[mg/m³]</p> <p>C_m : 유입구의 오염물질 농도[mg/m³]</p> <p>C_m : 자재내부의 오염물질 농도[mg/m³]</p> <p>C_{out} : 유출구의 오염물질 농도[mg/m³]</p> <p>D_a : 공기중 VOCs 확산계수[m²/s]</p> <p>D_m : 자재내부의 VOCs 확산계수[m²/s]</p> <p>$D_{m,ref}$: 기준온도의 자재내부 확산계수[m²/s]</p> <p>E : Arrenius 경험상수[무차원]</p> <p>E_1 : 증발지배에서의 초기 방출계수[mg/m²·h]</p>	<p>E_2 : 확산지배에서의 초기 방출계수[mg/m²·h]</p> <p>$E(t)$: 시간에 따른 방출계수[mg/m²·h]</p> <p>h_m : 대류물질전달계수[m/s]</p> <p>k_m : 물질전달계수[m/h]</p> <p>k_1 : 증발지배에서의 감쇠상수[h⁻¹]</p> <p>k_2 : 확산지배에서의 감쇠상수[h⁻¹]</p> <p>K_{ma} : 분배계수[무차원]</p> <p>M : 자재에 남아있는 오염물질 양[mg/m²]</p> <p>M_0 : 자재의 초기 오염물질 양[mg/m²]</p> <p>N : 환기회수[h⁻¹]</p> <p>$R(t)$: VOCs 방출속도[mg/h]</p> <p>T : 온도[°C]</p> <p>t : 시간[h]</p> <p>V : 실의 용적[m³]</p> <p>x : VOCs 확산방향 길이[m]</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7065; fax: +82-2-885-8057

E-mail address: snukkw@snu.ac.kr

1. 서론

주거 건물에서의 실내공기질은 최근 환경문제의 부각 및 심신의 건강과 쾌적을 보다 적극적으로 추구하는 입주자들의 의식 확산 등과 결부되어 그 관심과 개선 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 환경부에서 “다중이용시설등의실내공기질관리법”을 제정하여 주거 건물의 거주자들에게 기준을 만족하는 실내공기질을 제공할 수 있도록 하였다. 그런데 법규의 제정에 뒤따라 이의 적용을 받는 건축 설계자·시공자·거주자를 위한 후속 방안이 마련되어있지 않은 상태이다. 주거 건물의 설계자·시공자에게는 설계 및 시공 전에 실내공기질을 예측하여 사전에 이에 대한 대응이 가능하게 하여야 하고 거주자는 입주 전·후에 입주할 주거 건물에 대한 사전조사 및 사후평가를 가능하게 하여야 한다.

현재 미국, 캐나다, 유럽, 일본 등 국외에서는 오래전부터 실내공기질에 대한 중요성을 파악하고, 국가적 차원에서 실내공기질 예측기술과 보다 체계적인 실행을 위한 응용 도구들을 다수 개발하여 보급하고 있다. 이러한 프로그램들은 건축자재 데이터베이스를 활용하여 자재로부터의 오염물질 방출량에 따른 실내 농도를 예측하여 인체 위해도 평가와 자재 및 환기량 결정 등이 가능하도록 하고 있다^(1,2). 그런데 이러한 프로그램들은 설계 및 시공의 전반에 걸친 실내공기질 평가가 이루어지지 못하고 있으며, 실내공기질 지침과 연계된 개선방안 제시가 부족한 실정이다. 주거 건물의 통합적인 실내공기질 평가 및 지침 제공을 위해서는 설계·시공단계를 모두 고려한 성능평가 프로그램이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 주거 건물의 설계 및 시공단계를 고려한 실내공기질 성능평가 프로그램을 개발함으로써, 주거 건물의 설계 및 시공단계를 포괄한 실내공기질 사전평가를 실시하고 각 단계에 적합한 지침을 제시하여 실내공기질을 향상시킬 수 있도록 하는 것을 목표로 한다.

2. 실내공기질 모델링 기법 고찰

2.1 실내공기질 메커니즘

VOCs와 HCHO 등에 의한 실내공기의 오염은 오염물질 발생원으로부터의 방출(source), 오염물

질의 공기 중 이동에 의한 희석(dilution), 제거(removal) 과정에 의해 일어난다. 그 이후, 건물의 재실자가 실내 오염물질에 노출(exposure) 되게 된다.

건축자재에서 실내공기 중으로 방출되는 VOCs와 HCHO는 공기 중에서 희석되어 이동하는 과정에서 건축자재에 흡착되는 싱크효과(sink effect)가 발생하기도 한다. 이처럼 건축자재에 흡착된 오염물질은 추후 실내공기 중으로 탈착되는 현상이 발생한다. 그 이외에도 공기청정기 등의 기계장치 또는 광촉매 등의 분해·흡착체에 의해 실내공기 오염물질의 제거가 이루어지며 주거 건물에 거주하는 이의 오염물질에 대한 노출시간 및 장소에 의하여 사람에게 직접적인 영향을 주게 된다.

2.2 실내공기질 모델링 기법

실내공기질 모델링 기법은 오염물질의 방출·희석·제거·노출의 일련의 과정에 따라 방출 모델링(source modeling), IAQ 모델링(IAQ modeling), 재실자의 오염물질에 대한 노출정도 와 개개의 오염물질 반응도를 해석할 수 있는 노출 모델링(exposure modeling), 그리고 위해도 모델링(risk modeling)으로 분류할 수 있다⁽¹⁾. 이중 건축 설계 및 시공과 관련한 모델링은 방출 모델링과 IAQ 모델링으로써, 이에 대한 분류 및 상세한 내용은 Table 1과 같다.

(1) 방출 모델링

현재 국내외에서 건축자재의 VOCs 및 HCHO의 방출과정을 해석하기 위한 모델의 개발과 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 방출 모델은 크게 경험적 모델과 물질전달 모델로 구분할 수 있다^(3,4,5).

(2) IAQ 모델링

IAQ 모델링은 환기, 싱크효과 등을 고려하여 실내오염 농도를 예측하기 위한 모델로써, 크게는 압력차에 의한 실내 공기의 유동해석을 통한 실내오염물질의 수송을 해석하는 모델과 오염물질이 자재에 흡착 및 탈착되는 현상을 설명한 싱크 모델로 구분할 수 있다^(4,5).

Table 1 The classification of Indoor Air Quality modeling technique^(3, 4, 5)

Modeling		Definition		
Source modeling	Empirical model	The first order decay model was developed to describe wood stain VOC emissions. Then the double exponential decay model, two-phase model and so on has been developed. The core part of those models is : $R(t) = AE_0e^{-kt}$ Most of the empirical models were applied to predict the wet materials emissions except the double exponential decay model which is for the dry materials.		
	Mass-transfer model	The model is based on fundamentals of mass transfer processes : diffusion within the material, surface emissions between the material and the overlying air. Fick's second law is often used to describe the diffusion within the materials.		
IAQ modeling	Contaminant transport model	Single-zone	The room is assumed to be single-zone with well mixed concentration.	
		Multi-zone	Network	The room is multi-zone assuming each zone is well mixed. CONTAM, COMIS program is widely used.
			Zonal	The room is divided into several small zones to estimate more accurately.
			CFD	The CFD is a computational technology that divide the room into thousands of fragment by mesh. It enables estimating the dynamic air flow in the room.
	Sink model	The building materials can act as an adsorbing or re-emitting material. The sink model can be classified as statistical and theoretical sink models.		

3. 실내공기질 성능평가 프로그램 개발

실내공기질 메커니즘 및 모델링 기법 고찰을 통하여, 건축 설계 및 시공단계에서의 영향인자를 선정하고 각 영향인자를 반영할 수 있는 실내공기질 평가기법을 선정하였다. 이를 바탕으로 평가 알고리즘을 작성하고 프로그래밍을 실시하였다.

3.1 실내공기질 영향인자 선정

설계 및 시공단계에서 실내공기질에 영향을 미치는 요소는 건축 프로세스별로 범위와 특징이 상이하므로, 실내공기질을 고려한 건축 프로세스를 수립한 후에 단계별 영향요소가 도출되어야 한다. 이를 위해 일반적인 건축 프로세스로부터 실내공기질을 중심으로 한 건축 프로세스를 도출하였으며 이는 Fig. 1과 같다⁽⁶⁾.

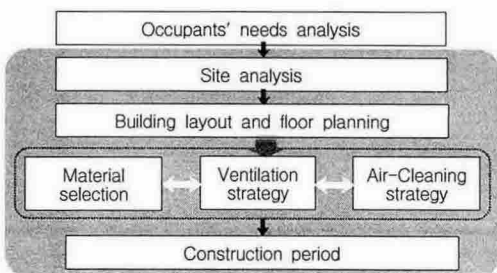


Fig. 1 Building process focused on IAQ⁽⁶⁾

앞서 고찰한 실내공기질의 메커니즘을 바탕으로 Fig. 1의 건축 프로세스에 따른 단계별 영향요소의 구체적인 항목을 도출하였으며, 이와 더불어 주거 건물의 성능평가 프로그램의 입력 및 출력데이터로 활용하기 위한 방안을 다음 Table 2와 같이 제시하였다.

Table 2 The IAQ factors considering the building process and the program application

Process	Factor	Application	
Site analysis	outdoor concentration	· outdoor concentration (mg/m ³) · DB for the outdoor concentration	
	outdoor airflow condition	· inflow air flow rate (m ³ /h)	
Building layout and floor planning	building layout	· inflow air flow rate (m ³ /h)	
	floor planning	· room volume (m ³)	
Material selection	finishing material	· material emission rate (mg/m ² h)	
	furniture	· area(m ²)	
Ventilation strategy	natural	opening plan	
	mechanical	ventilation system	· inflow air flow rate (m ³ /h)
Air-Cleaning strategy	air cleaner	· eliminated contaminants(mg/m ³)	
Construction period	method/material	construction method	· material installation period
		material deposit	-
	management	ventilation	· inflow air flow rate (m ³ /h)
		bake-out	· material emission rate (mg/m ² h)

건축 설계단계에는 대지분석, 건물 배치·평면 계획, 자재 선정, 환기계획, 그리고 공기정화계획이 이루어진다. 이때, 외기농도를 입력함으로써 대지의 위치를 반영할 수 있도록 하였으며, 외부 기류조건, 건물 배치에 따른 자연환기는 실내로 유입되는 환기량에 의하여 반영할 수 있도록 하였다. 또한, 마감자재의 설치면적 및 방출속도를 입력하여 자재의 선정에 따른 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 여기서, 각 마감자재들의 설치시기를 입력함으로써 시공순서에 따른 실내공기질에 미치는 영향을 반영할 수 있도록 하였다.

3.2 모델링 기법 선정

실내공기질 모델링 기법의 분석을 바탕으로, 주거 건물의 실내공기질 영향인자를 반영하여 VOCs 및 HCHO를 해석할 수 있는 방출 모델링과 IAQ 모델링 기법을 선정하였다.

(1) 방출 모델링(Source modeling)

국내 주거건물에 주로 사용되는 마감자재는 벽 및 천장 부위에는 도배지, 바닥 부위에는 온돌마루 또는 림마루이며, 가구는 중밀도섬유판과 합판 등이 적용되고 있다. 이러한 마감자재들은 대부분 건자재(dry material)이며 접착제 등의 습자재(wet material)와 함께 복합자재로써 사용되고 있다. 본 마감자재들의 VOCs 및 HCHO의 방출량을 반영하기 위하여 경험적 모델과 물질전달 모델을 모두 적용하여 사용자의 선택에 따라 사용가능하도록 하였다. 프로그램에 적용된 방출 모델링의 수식은 식(1)~(6)과 같다^(3, 4, 5).

- 경험적 모델
 - 건자재(dry material)

$$E(t) = A(E_1e^{-k_1t} + E_2e^{-k_2t}) \quad (1)$$

- 습자재(wet material)

$$R(t) = Ak_m(C_0M/M_0 - C_a) \quad (2)$$

- 물질전달 모델

- 자재 내부

$$\frac{\partial}{\partial x} (D_m \frac{\partial C_m}{\partial x}) = \frac{\partial C_m}{\partial t} \quad (3)$$

- 자재 표면

$$C_m = K_{ma} C_{as} \quad (4)$$

- 경계층

$$R(t) = h_m(C_{as} - C_a) \quad (5)$$

- 실내 공기

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = NC_{in} - NC_{out} - \frac{A}{V} D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (6)$$

(2) IAQ 모델링(IAQ modeling)

건물은 거실, 침실 등의 다수의 존으로 이루어져서 개구부를 통한 공기유동의 상호 관계에 의해서 유동이 결정되어진다. 일반적으로 주거 건물에서 각 실의 문을 개방하였을 경우 전체 실내 농도가 완전 혼합되는 것으로 가정하고 있다. 이를 고려하여, 오염물질 수송모델은 single-zone으로 가정하여 해석하였다.

싱크효과는 오염물질이 자재에 흡착 및 탈착되는 현상으로, 국외에서는 카펫 등의 싱크효과가 큰 자재들에 대한 연구를 수행하여 여러 해석 모델을 개발하고 있다. 그러나 현재 국내 주거 건물에 적용되는 주요 건축자재의 경우 일반 실내 온습도 조건에서 싱크효과에 의한 영향이 적은 것으로 판단되고 있다⁽⁵⁾.

위의 모델링 기법 선정과정을 종합하면 Fig. 2와 같다.

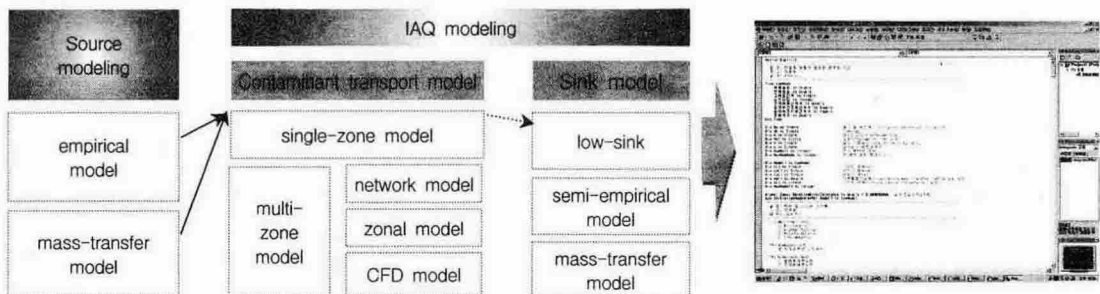


Fig. 2 The modeling decision for IAQ evaluation program and Visual Basic coding screen sample

3.3 프로그램 시나리오 및 알고리즘 작성

주거 공간의 실내공기질 평가를 위하여 Fig. 3 과 같이 프로그램의 시나리오를 설정하였다. 사용자에게 따라 성능평가 및 지침모듈을 선택할 수 있으며, 성능평가 이후 지침을 반영하여 feedback을 통한 재평가가 가능하다. 또한, 영향인자들에 대한 효율적인 해석을 위하여 Fig. 4와 같이 알고리즘을 작성함으로써 입력 및 계산에 필요한 변수들의 자료구조를 확립하고 자료처리를 통해 결과 출력이 이루어지도록 하였다.

3.4 건축자재 데이터베이스 구축

건축자재의 오염물질 방출 예측을 위한 성능평가 프로그램의 활용성을 높이기 위하여 각 개별 건축자재의 오염물질 방출특성 관련인자들 중 자재의 물리적 관련인자들의 물성치들을 획득하여 이를 데이터베이스(database, DB)로 구축하였다. 성능평가 프로그램은 DB에 저장되어 있는 건축자재의 물리적 관련인자들의 값을 불러들임으로써 대상 환경조건에 대한 오염물질의 방출을 예측할 수 있다. 이를 위해 DB의 구성항목을 결정하고 각 항목에 해당하는 건축자재의 물성치를 획득할 수 있는 방법을 확립하였다.

건축자재 DB 체계의 항목은 건축자재 내부의 오염물질의 고유한 물성치를 갖는 인자를 포함하며, 이는 앞서 선정된 모델링 기법에 의해 경험적 모델의 감쇠상수(k), 물질전달 모델의 확산계수(D_m) 및 분배계수(K_{ma})와 같다. 각 계수는 개별 건축자재가 포함하고 있는 오염물질별로 고유한 값을 가지므로 이를 DB로 구축하여 해당 자재의 오염물질 방출특성을 예측하기 위한 모델링의 입력값으로 활용이 가능하다. 이와 더불어, 예측 모델링의 초기값으로써, 자재내부의 오염물질 초기농도(E, C_0)의 수치가 필요하다.

위와 같이 도출된 물질전달 계수들은 직접 측정을 통하여 구할 수 있다. 여기서, 직접 측정법은 복잡한 실험기기를 이용하여야 하며 비용 및 시간의 소모가 큰 단점이 있다. 또한 Bodalal⁽⁷⁾은 직접 측정법이 $\pm 18\%$ 의 오차를 나타내고 있다고 하였다. 이러한 직접 측정법의 제약사항에 따라 curve fitting 추정법을 통하여 계수들을 획득할 수 있다. curve fitting 추정법은 방출예측 및 챔버실험을 동시에 실시하여 방출 곡선의 best fit이 되도록 미지의 계수들을 추정하는 방법이다⁽⁵⁾.

따라서 본 프로그램에서는 k, E, D_m, K_{ma}, C_0 의 계수값에 대하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 curve fitting 추정법을 프로그램화하여 도출할

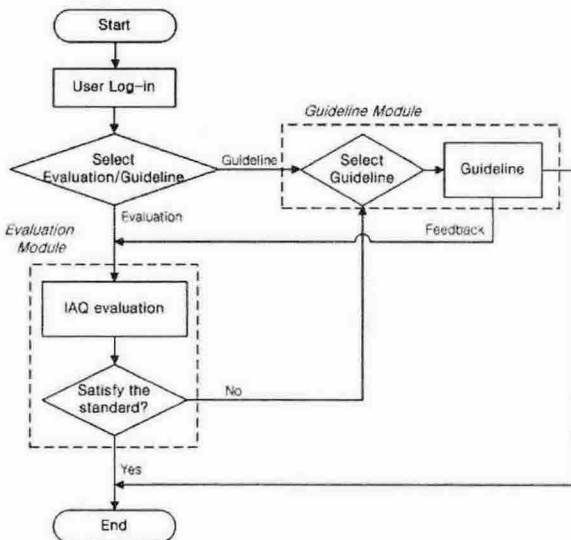


Fig. 3 Program scenario

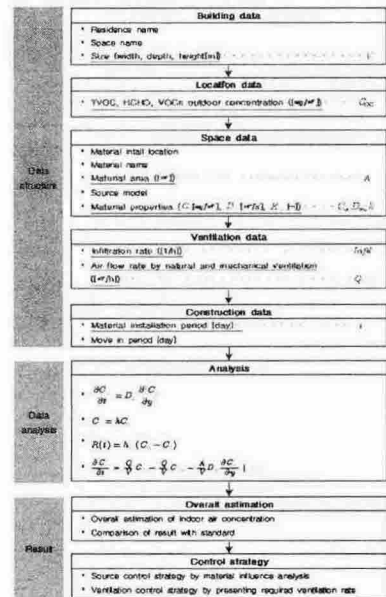


Fig. 4 Program algorithm

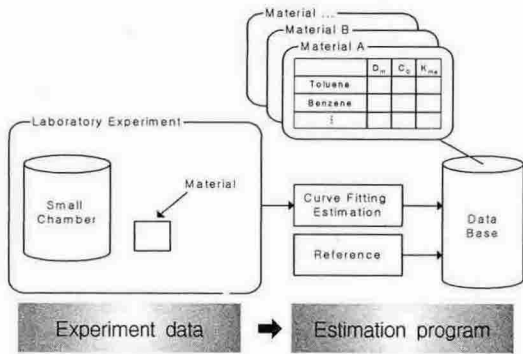


Fig. 5 The relation between the material DB in the program and experiment data

수 있도록 하였다. 이때, curve fitting을 위한 실험 결과 데이터는 친환경자재 인증시험 등의 데이터를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 실내공기질 모델링 기법의 고찰을 통하여 주거 건물의 건축 설계 및 시공단계를 고려할 수 있는 실내공기질 성능평가 프로그램을 개발하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 건축 설계 및 시공단계에서 실내공기질에 영향을 미치는 요소를 건축 프로세스별로 도출하고 주거 건물의 성능평가 프로그램의 입력 및 출력데이터로 활용하기 위한 방안을 제시하였으며, 이는 Table 2와 같다.

(2) 방출 모델로써 경험적 모델과 물질전달 모델을 모두 적용하여 국내 주거공간의 주요 건축재 및 그 하부에 설치되는 습자재의 해석이 가능하도록 하였으며, 이때 시공단계의 자재 설치시기를 반영할 수 있도록 하였다. IAQ 모델은 single-zone 모델을 선정하여 주거공간의 대표값을 통한 객관적인 평가가 가능하도록 하였다.

(3) 실내공기질 성능평가 프로그램의 시나리오를 설정하고, 알고리즘을 작성하여 자료구조를 확립하고 자료처리를 통해 결과 출력이 이루어지도록 하였으며, 이는 Fig. 4, 5와 같다. 실내공기질 성능평가 이후 지침을 반영하여 feedback을 통한 재평가가 가능하도록 하였다.

(4) 건축자재의 오염물질 방출 예측을 위한 성능평가 프로그램의 활용성을 높이기 위하여 건축

자재의 방출특성을 데이터베이스화하였으며, DB의 항목은 감쇠계수(k), 확산계수(D_m), 분배계수(K_{ma}), 초기농도(E , C_0)와 같다.

본 연구는 주거 건물의 실내공기질 평가를 위한 프로그램 개발을 목적으로 하고 있으며, 이러한 프로그램 평가 결과의 신뢰성 확보를 위한 검증이 요구된다. 이에 따라 현장실험과의 비교를 통한 검증을 추가로 실시할 예정이다.

후 기

본 연구는 환경부 2004년도 차세대 핵심환경기술개발사업(013-041-035)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. EPA, 2000, Simulation tool kit for IAQX Version 1.0 User's Guide, pp. 10-30.
2. Won, D., et al., 2005, A material emission database for 90 target VOCs, Proceedings of Indoor Air 2005, pp. 2270-2075.
3. Guo, Z., et al., 1999, Estimation of the rate of VOC emissions from solvent-based indoor coating materials based on product formulation, Atmospheric Environment 33, pp. 1205-1215.
4. Yang, X., 1999, Study of Building Material Emissions and Indoor Air Quality, Ph.D Thesis, MIT, USA.
5. Huang, H., 2003, Modeling of volatile organic compounds emissions and sinks from building materials, Ph.D Thesis, The Concordia University, Canada.
6. Kang, D., et al., 2004, A study on modeling application for Indoor Air Quality evaluation, Architectural Institute of Korea, v.24 n.2.
7. Bodalal, A. S., 1999, Fundamental Mass Transfer Modeling of Emission of Volatile Organic Compounds from Building Materials, Ph.D Thesis, Carleton University, Canada.